

# Boletín 45

## GUÍA PARA MEJORAR EL COMPORTAMIENTO ANTE DESCARGAS ATMOSFERICAS DE LAS LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN NORMA IEEE 1410

Boletín técnico N°45  
PARTE 2  
Ing. Gregor Rojas

Caracas - Venezuela

## GUÍA PARA MEJORAR COMPORTAMIENTO ANTE DESCARGAS ATOSFERICAS DE LAS LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN NORMA IEEE STD 1410

### PARTE 2

Por:

**Ing. Gregor Rojas**  
GERENTE NACIONAL  
MERCADEO Y VENTAS  
División materiales eléctricos

#### 1. Generalidades.

Las líneas de transmisión y distribución eléctricas sirven para transportar y distribuir energía eléctrica, se dividen principalmente en dos grandes categorías, líneas de transmisión aéreas y líneas de transmisión subterráneas.

Las descargas atmosféricas son la mayor causa de fallas de las líneas aéreas típicas de distribución. La creciente preocupación por la calidad de la energía eléctrica ha creado aún más interés en las descargas atmosféricas y el mejoramiento de las protecciones contra las descargas atmosférica de las líneas aéreas de distribución está siendo considerado como una forma de reducir el número de interrupciones momentáneas y las disminuciones de voltaje.

Las descargas atmosféricas causan generalmente fallas temporales en las líneas aéreas de distribución. Si la falla es aclarada por un interruptor o por un conmutador, el circuito será cerrado exitosamente.

Este boletín técnico es la continuación de la traducción de la norma IEEE 1410 que es una guía de diseño que contiene información sobre métodos para mejorar el rendimiento contra descargas atmosféricas de las líneas aéreas de distribución y está escrita para el diseñador de líneas de distribución.

#### 6. Nivel de aislamiento de la línea de distribución

Esta guía pretende ayudar al ingeniero de diseño a optimizar la capacidad de los aisladores ante las descargas atmosférica en las líneas aéreas de distribución.

Muchas de las construcciones aéreas utilizan más de un material aislante para protección contra las descargas atmosféricas.

Los componentes más comunes utilizados en la construcción de líneas aéreas de distribución son porcelana, aire, madera, polímero y fibra de vidrio. Cada elemento tiene su propia capacidad de aislamiento.

Cuando los materiales aislantes se utilizan en serie el nivel de aislamiento resultante no es la suma de los niveles asociados con los componentes individuales, sino que es algo menos que dicho valor.

Los siguientes factores afectan los niveles de flameo (flashover) ante descargas atmosférica de líneas de distribución y dificultan estimar el nivel de aislamiento total:

- Condiciones atmosféricas tales como densidad del aire, humedad, precipitación pluvial y contaminación atmosférica.
- Polaridad y velocidad de incremento de voltaje.
- Factores físicos tales como la forma del aislador, la forma del herraje metálico, y la configuración del aislador si es montado verticalmente, horizontalmente o en ángulo.

Si existe madera en la trayectoria de la descarga atmosférica, el efecto de la misma sobre la capacidad de aislamiento puede ser muy variable dependiendo principalmente de la humedad en la superficie de la madera.

La capacidad de aislamiento depende en un menor grado de las dimensiones físicas de la madera.

Aunque el ingeniero de diseño debe estar más familiarizado con el nivel básico de aislamiento, NBA que denominamos BIL, de una combinación dada de materiales aislantes, los resultados de esta guía están dados en términos del voltaje de flameo de impulso crítico, VFIC (CFO), de estas combinaciones.

El voltaje de flameo de impulso crítico se define como el nivel de voltaje al cual estadísticamente existe el 50% de probabilidad de flameo. Este valor es un punto definible en el laboratorio.

Si se asume que los datos de flameo presentan una distribución de Gauss, entonces cualquier probabilidad específica de no flameo puede calcularse a partir del voltaje de flameo de impulso crítico y de la desviación estándar.

Una vez que se tuvieron disponibles todos los datos de laboratorio, se estudiaron varios métodos tratando de desarrollar un procedimiento para determinar el voltaje de flameo de impulso crítico esperado, VFIC (CFO), de una combinación de componentes dados. La aproximación de capacidad de aislamiento aditiva puede ser la más práctica.

Este método fue adoptado de un procedimiento similar utilizado anteriormente en el diseño de líneas de transmisión pero ha sido ampliado en su aplicación a múltiples componentes aislantes usados en la construcción de líneas de distribución.

El método utiliza el voltaje de flameo de impulso crítico, VFIC, del elemento aislante básico o primario y agrega a este valor los incrementos en VFIC ofrecidos por los componentes adicionales, (teniendo siempre presente que la capacidad de

aislamiento aditiva es siempre menor que la de un elemento simple adicionado).

### **6.1. Voltaje de flameo de impulso crítico, VFIC, de un aislamiento combinado**

Desde tiempos lejanos los ingenieros electricistas han estado construyendo líneas de distribución utilizando crucetas y postes de madera en serie con aisladores básicos para aumentar la resistencia al impulso atmosférica del aislamiento de la línea de distribución.

A comienzos de 1930, se presentaron una gran cantidad de documentos donde los aisladores fueron ensayados en combinación con madera. Apareció una pregunta acerca de cuanto voltaje de aislamiento ante descargas atmosférica agregaba la madera al aislamiento primario (el aislador). Una respuesta parcial llegó después de investigaciones en muchos laboratorios, y los resultados fueron publicados en las décadas de 1940 y 1950.

Un resumen general de los trabajos previos sobre voltaje de flameo de impulso crítico, VFIC, fue presentado en el Reporte del Comité de AIEE de 1950 y en un nuevo reporte en 1956, sin embargo, estos resultados tenían aplicación principalmente en líneas de transmisión y no en la construcción de líneas de distribución.

En las líneas aéreas de distribución, el aislamiento más débil está generalmente en una estructura del poste más que entre conductores a través del aire.

Más recientemente, las investigaciones sobre combinaciones de multidieléctricos utilizados en sistemas de energía eléctrica han continuado, estas investigaciones tienen que ver con líneas de distribución y de transmisión y los niveles de voltaje que soporta la madera cuando se somete a descargas atmosféricas, tipo maniobra y frente de onda escarpado. Últimamente, han sido introducidos a las líneas de distribución aisladores poliméricos y crucetas de fibra de vidrio.

## 6.2. Determinación del vfic de estructuras con aislamiento en serie

Los estudios han indicado que un (1) metro de madera o de fibra de vidrio agregan aproximadamente 330 – 500 kV a la resistencia al impulso del aislamiento total. Para longitudes superiores, la capacidad de aislamiento atmosférica de la cruceta de madera o de fibra de vidrio y la combinación con el aislador están determinadas principalmente por la sola cruceta de madera o de fibra de vidrio. El aislamiento de voltaje alterno se obtiene para el aislador solo y la cruceta de madera o de fibra de vidrio se considera como aislamiento adicional para voltaje de descarga atmosférica.

Cuando la trayectoria de la descarga atmosférica a tierra no incluye una cruceta de madera o de fibra de vidrio, pero envuelve dos o más tipos de aisladores en serie, el VFIC de la combinación no se obtiene simplemente sumando los VFIC individuales de los componentes. Los VFIC de estos aislamientos combinados son controlados por un número de factores diferentes, cada uno de los cuales requiere un análisis individual. Hoy en día, existen muchas diferentes combinaciones y configuraciones utilizadas por las compañías operadoras.

El método del VFIC – aditivo extendido puede usarse para estimar el VFIC de una estructura de distribución:

- Determinando la contribución de cada componente individual del aislamiento al VFIC total de la combinación.
- Estimando el VFIC total de la combinación, conociendo el VFIC de los componentes aislantes.

Esto puede hacerse utilizando tablas y curvas que muestren los datos experimentales disponibles y utilizando estos datos para relacionar el efecto de un material adicionado a otro. Este procedimiento

considera válidos los datos característicos del VFIC del aislamiento base y un grupo adicional de datos dados como el VFIC adicionado por un componente específico.

En aquellas configuraciones en las cuales aparecen dos componentes, el VFIC de la combinación es mucho más bajo que la suma de los VFIC individuales. El aislador se considera como el aislamiento primario o aislamiento básico.

El voltaje de flameo de impulso crítico, VFIC, obtenido por configuraciones consistentes de dos componentes se calcula como el VFIC del componente básico más el VFIC adicionado por el segundo componente.

El VFIC total calculado para dos componentes es:

$$VFIC_T = VFIC \text{ aislador} + VFIC_{\text{adic.2}^\circ \text{comp}} \quad (9)$$

Donde:

VFIC aislador = VFIC del componente primario

VFIC<sub>adic.2°comp</sub> = VFIC adicionado por el segundo componente

El VFIC total calculado para tres o más componentes es:

$$VFIC_T = VFIC \text{ aisl} + VFIC_{\text{adic.2}^\circ \text{comp}} + VFIC_{\text{adic.3}^\circ \text{comp}} + VFIC_{\text{adic.n}^\circ \text{comp}} \quad (10)$$

Donde:

VFIC<sub>adic.3°comp</sub> = VFIC adicionado por el tercer componente

VFIC<sub>adic.n°comp</sub> = VFIC adicionado por el enésimo componente

Los valores de VFIC individual y el adicionado de los componentes más utilizados en distribución están dados en las tablas 2 a 4.

<b>TABLA 2</b> <b>Aislamiento primario (VFICins)</b>		
<b>Aislador</b>		<b>KV</b>
Pin	ANSI 55-4	105
	ANSI 55-5	120
	ANSI 55-6	140
Suspensión de porcelana	1-10,2 cm (4 in)	75
	2-10,2 cm (4 in)	165
	3-10,2 cm (4 in)	250

<b>TABLA 2 continuación</b> <b>Aislamiento primario (VFICins)</b>	
<b>Aislamiento</b>	<b>KV/m</b>
Aire	600
Poste de madera	330
Cruceta de madera	360
Separador de fibra de vidrio	500

<b>TABLA 3</b> <b>VFIC añadido segundo componente (VFIC add.sec)</b>		
<b>Segundo componente</b>	<b>Con primer componente</b>	<b>KV/m</b>
Cruceta de madera	Aislador pin vertical	250
Cruceta de madera	Aislador suspensión vertical	160
Cruceta de madera	Aislador suspensión horizontal	295
Poste de madera	Aislador pin vertical	235
Poste de madera	Aislador de suspensión	90
Cruceta fibra de vidrio	Aislador	250
Separador fibra de vidrio	Aislador	315

<b>TABLA 4</b> <b>VFIC añadido tercer componente (VFIC add.thir)</b>	
<b>Tercer componente</b>	<b>KV/m</b>
Poste de madera	65
Separador de madera	200

Notas para tablas 2 a 4

- 1- Todos los valores son para VFIC en húmedo.
- 2- Los valores corresponden a los mínimos de polaridad positiva o negativa.
- 3- Los aisladores se muestran como ejemplo solamente. Para valores más exactos refiérase a los datos del fabricante.

Los valores dados en las tablas se refieren a condiciones húmedas las cuales son recomendadas para estimar el valor de VFIC. Para valores de VFIC bajo condiciones secas suministradas por el fabricante o tomadas de pruebas de impulso de un laboratorio, multiplique el VFIC por 0.8 para obtener un valor estimado del VFIC en condiciones húmedas. El VFIC en condición húmeda está típicamente entre 0.7 y 0.9 del VFIC en condiciones secas

Para componentes no dados en la tabla 3 o en la tabla 4, el VFIC total puede ser estimado por reducciones para el segundo y tercer componente como:

$$\text{VFIC}_{\text{adic.2}^{\circ}\text{comp}} = 0.45 \text{ VFIC}_{\text{aislador}}$$

$$\text{VFIC}_{\text{adic.3}^{\circ}\text{comp}} = 0.20 \text{ VFIC}_{\text{aislador}}$$

El uso del método del VFIC - aditivo extendido y las tablas dadas en esta guía darán respuesta generalmente dentro de un  $\pm 20\%$  de error. Estimaciones más seguras se logran con los siguientes métodos:

- a) Efectuar pruebas de impulso en el laboratorio de la estructura en estudio, bajo condiciones húmedas. Este método dará los resultados más seguros.
- b) Efectuar pruebas de impulso bajo condiciones secas y multiplicar los valores

obtenidos por 0.8 para estimar el VFIC en condiciones húmedas.

- c) Utilice VFIC de componentes más detallados
- d) Haga referencia a otros resultados de pruebas de estructuras de distribución

### **6.3. Consideraciones prácticas**

El equipo y el conjunto de accesorios metálicos de las estructuras de distribución puede reducir drásticamente el VFIC. Este punto débil de las estructuras puede aumentar en gran parte los flámeos por voltajes inducidos. Varias situaciones se describen a continuación.

#### **6.3.1 Cables tensores.**

Los cables tensores pueden ser un factor importante en la reducción del VFIC de la estructura.

Por ventaja mecánica, los cables tensores están conectados en la parte alta del poste, en general en la vecindad de los elementos aislantes principales. Puesto que los cables tensores proveen una trayectoria a tierra, su presencia generalmente reduce el VFIC de la configuración. Los pequeños aisladores de porcelana tipo tensor que se utilizan proveen muy poco de extra aislamiento, (generalmente menos de 30 kV de VFIC).

Puede utilizarse entonces un aislador tensor de fibra de vidrio para ganar una considerable capacidad de aislamiento. Un aislador tensor de fibra de vidrio tiene un VFIC de 250 kV aproximadamente.

#### **6.3.2 Fusibles cortacircuitos.**

El montaje de los fusibles cortacircuitos es un ejemplo primario de un equipo desprotegido que puede disminuir el VFIC del poste. Para sistemas de la clase 15 kV, un fusible cortacircuitos puede

tener un nivel básico de aislamiento, NBA (BIL), de 95 kV.

Dependiendo de cómo esté montado el cortacircuitos, el puede reducir el VFIC de toda la estructura hasta aproximadamente 95 kV, (aproximadamente porque el nivel básico de aislamiento, NBA (BIL), de cualquier sistema aislante es siempre menor que el VFIC de dicho sistema).

En postes de madera, el problema de los fusibles cortacircuitos puede ser mejorado colocando los cortacircuitos de tal manera que el brazo de montaje en el poste esté bien alejado de cualquier conductor conectado a tierra, (cables tensores, cables de guarda y cables de neutro). Esto también es válido para interruptores y otras piezas de equipo no protegidas por descargadores para descarga atmosférica.

#### **6.3.3 Altura del cable de neutro.**

En cualquier línea dada, la altura del cable de neutro puede variar dependiendo del equipo conectado. En postes de madera, mientras más cerca está el cable de neutro de los cables de fase, menor el VFIC.

#### **6.3.4 Soportes y estructuras conductoras.**

El uso de estructuras de concreto y de acero en líneas aéreas de distribución está en aumento, lo cual reduce enormemente el VFIC, además, crucetas metálicas y conjuntos de accesorios metálicos se están utilizando en postes de madera. Si tales elementos metálicos están conectados a tierra, el efecto puede ser el mismo que el de tener una estructura metálica.

En tales estructuras, el VFIC total es suministrado por el aislador y por lo tanto, aisladores con mayor VFIC deberán ser utilizados para compensar las pérdidas del aislamiento de la madera. Obviamente, se efectúan cambios dependiendo del comportamiento esperado a las descargas atmosférica y otras consideraciones tales como

diseño mecánico y económico. Pero es muy importante saber que dichos cambios existen.

El diseñador deberá estar enterado de los efectos negativos que los elementos metálicos puedan tener en el comportamiento a las descargas atmosférica y tratar de minimizar dichos efectos. En configuraciones con postes de madera y crucetas, pueden utilizarse brazos de madera o de fibra de vidrio para mantener buenos niveles de aislamiento.

### **6.3.5 Circuitos múltiples.**

Los circuitos múltiples en un poste causan generalmente un aislamiento reducido ya que se tienen distancias más estrechas entre fases y menos madera en serie. Esto es especialmente cierto en circuitos de distribución en postes de madera construidos por debajo de circuitos de transmisión. Los circuitos de transmisión tienen frecuentemente un cable de protección con una línea de tierra en cada poste. La línea de tierra puede causar reducción en el aislamiento. Pero este puede mejorarse alejando la línea de tierra del poste con espaciadores de fibra de vidrio.

### **6.3.6 Circuitos con espaciadores de cable.**

Circuitos con espaciadores de cable son circuitos aéreos de distribución con espaciamientos muy reducidos. Cable cubierto y espaciadores, (15 a 40 cm), colgados de un cable mensajero proveen soporte y capacidad de aislamiento.

Una configuración de espaciador de cable tendrá un VFIC fijo, generalmente en el rango de 150 – 200 kV. Debido a su relativamente bajo nivel de aislamiento, su comportamiento ante las descargas atmosférica puede ser más bajo que el más tradicional diseño abierto. Es muy poco lo que se puede hacer para incrementar el VFIC de un diseño con espaciador de cable.

Un diseño con espaciador de cable tiene la ventaja de un cable mensajero que actúa como un cable de protección.

Este puede reducir algunos flámeos por descargas directas. Flámeos inversos ocurrirán debido al bajo nivel de aislamiento. Si se mejoran las puestas a tierra se mejora el comportamiento contra las descargas atmosférica.

### **6.3.7 Distancias explosivas (spark gaps) y unión de aislamientos.**

La unión de aisladores se efectúa algunas veces para prevenir el daño causado por la descarga atmosférica en los postes o crucetas de madera, o también se hace para prevenir la quema de la parte superior del poste de madera. Las distancias explosivas son utilizadas para prevenir el daño causado por las descargas atmosférica en los materiales de madera, (este incluye los ensambles para protección de postes especificados por la REA). En algunas partes del mundo, las distancias explosivas (spark gaps) son utilizadas en lugar de los descargadores para protección del equipo.

Las distancias explosivas y unión de aisladores reducirán enormemente el VFIC de la estructura. De ser posible, distancias explosivas, unión de aisladores, y ensambles para protección de postes no deberían ser utilizados para prevenir daño de la madera. Las uniones locales de aislador – madera en la base del aislador son una mejor solución para evitar daños en la madera y quema de postes como se discute en el numeral 6.5.

### **6.4. Capacidad de la madera de extinguir el arco**

Los postes y crucetas de madera han demostrado capacidad de extinguir el arco causado por las descargas atmosférica y prevenir la formación de una falla de energía.

La capacidad de la madera para extinguir el arco es predominantemente una función del voltaje instantáneo a través del arco en el instante del flameo causado por la descarga atmosférica. Si el voltaje está cruzando cerca de cero, es mucho más fácil que se extinga el arco sin causar una falla. Si el voltaje nominal a lo largo de la cruceta

de madera se mantiene por debajo de un cierto nivel, la posibilidad de que se desarrolle la falla puede ser reducida enormemente.

Si ocurren flámeos múltiples, la extinción del arco es mucho menos probable (ver figura 6). La mayor parte de las líneas de distribución soportarán flámeos múltiples de una descarga directa.

En estructuras de distribución que tienen gradientes de voltaje RMS a través de la madera mayores de 10 kV/m de madera, la extinción del arco puede que no proporcione un beneficio significativo. Por ejemplo, una línea de distribución de 13.2 kV con 0.5 m de madera entre el aislador de fase y el cable de neutro tiene un gradiente de voltaje RMS a través de la madera de  $132\text{kV}/3/0.5\text{m} = 15.2 \text{ kV/m}$ .

Para este voltaje, si los espaciamientos de madera de 1 m se logran entre todas las fases conductoras y todos los objetos con puestas a tierra en el poste, entonces la extinción del arco es un factor significativo. Esto puede lograrse fácilmente en circuitos con altos niveles de aislamiento y grandes distancias de madera. Para esta guía, se ha hecho una suposición conservadora que todos los flámeos causan fallas.

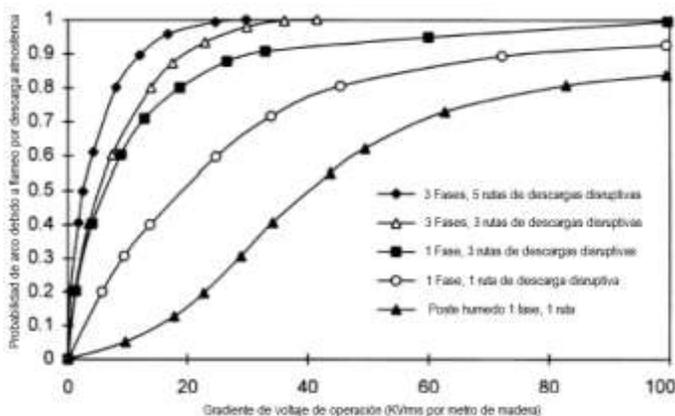


Figura 6. Probabilidad de un arco de potencia debido a un flameo por descarga atmosférica sobre una cruceta de madera húmeda

### 6.5. Daños a la madera causados por descargas atmosférica

La experiencia de servicio indica que el daño a postes o crucetas debido a las descargas atmosférica es relativamente escaso. No obstante, en áreas de alto nivel de descargas atmosféricas puede ser de importancia bajo ciertas condiciones. La probabilidad de daños debida a descargas atmosférica depende de muchos factores, especialmente al contenido de humedad y al envejecimiento de la madera.

Cuando la falla es interna en la madera y no en la superficie de la misma ocurren interrupciones de tipo destructivo. Si la madera está verde, lo más probable es que la falla sea interna.

Si los registros históricos muestran que el daño de la madera es un problema, la madera deberá protegerse por unión de aisladores. Sin embargo, esto cortocircuita la capacidad de aislamiento que provee la madera. Una mejor solución puede ser el uso de electrodos superficiales fijados cerca al aislador de pin. Esto puede incluir alambre enrollado, bandas, u otras extensiones metálicas colocadas cerca al aislador en la probable dirección del flameo. Esto favorece la falla cerca de la superficie en lugar de la falla interna.

Medidas preventivas para daños a la madera por descargas atmosférica reducirán también la probabilidad de quemaduras en la parte superior de los postes. Quemaduras en la parte superior de los postes son el resultado de arcos de corrientes de fuga en la superficie de separación metal-madera. Unión local, utilizando bandas o alambre enrollado, servirán de puente en aquellos puntos en los cuales la chispa está más propicia a iniciarse por los pobres contactos metal-madera. Esto es preferible a unir completamente los aisladores.

### 7. Protección con cable de guarda de líneas de distribución.

Los cables de guarda son conductores conectados a tierra y colocados sobre los conductores de fase

para interceptar las descargas atmosféricas las cuales podrían caer directamente sobre las fases. La corriente de la descarga atmosférica es desviada a tierra a través de una línea de tierra en el poste. Para que sea efectivo, el cable de guarda deberá tener su puesta a tierra en cada poste.

La corriente de la onda de descarga atmosférica que fluye a través de la impedancia a tierra del poste causa un aumento de potencial que da como resultado una gran diferencia de potencial entre la línea de tierra y los conductores de fase. La diferencia de potencial puede generar un flameo inverso a través del aislamiento de la línea de tierra a uno de los conductores de fase.

El fenómeno del flameo inverso o backflashover es una exigencia sustancial para la efectividad del cable de guarda en aplicaciones de la línea de distribución. Los cables de guarda proveerán una protección efectiva solamente si:

- a) Se utilizan buenas prácticas de diseño del aislamiento para proveer suficiente VFIC entre la línea de tierra y los conductores de fase.
- b) Se obtienen bajas resistencias a tierra en el poste.

La figura 5 puede ser usada para estimar el número de flámeos inducidos para un diseño de cable de guarda.

Para circuitos de distribución de tres fases, agregar el cable de guarda reducirá el número de flámeos inducidos. Puesto que el cable de guarda está sólidamente puesto a tierra, eliminará los voltajes en los conductores de fase a través del acople capacitivo. Mientras más cercanos estén los conductores de fase del cable de guarda, mejor el acople y mucho más bajos serán los voltajes inducidos, (aunque esto puede reducir el VFIC como se anotó en el numeral 6.3). Observe que adicionar un cable de guarda por debajo de

los conductores de fase tendrá aproximadamente el mismo efecto que un cable de guarda por encima.

En un sistema de cuatro cables, con múltiples puestas a tierra, reemplazar el cable del neutro con un cable de guarda por encima, no reducirá el número de flámeos inducidos. Sin embargo, teniendo ambos, un cable de guarda y un cable de neutro mejorará en algún grado su comportamiento.

El costo de incluir el cable de guarda en el diseño de una línea de distribución puede ser sustancial. Adicional al costo del conductor, las varillas de tierra, y aislamiento adicional, las alturas del poste deben ser mayores para soportar el cable de guarda de tal manera que exista el adecuado ángulo de apantallamiento entre el cable de guarda y los conductores de fase más externos.

La mayor altura de la estructura atraerá más descargas directas, y esto compensará ligeramente algunas de las reducciones en las tasas de flameo generadas por el apantallamiento.

A pesar del costo y las dificultades del diseño, los cables de guarda han sido utilizados por varias empresas de energía con gran éxito.

### **7.1. Ángulo de apantallamiento**

Para garantizar que todas las descargas atmosféricas terminen en el cable de guarda en lugar de que ocurra en los conductores de fase, se recomienda un ángulo de apantallamiento de 45° o menos, como lo muestra la figura 7, es recomendado. Esta directriz solo es válida para líneas que tengan menos de 15 m de altura con espaciamiento entre conductores por debajo de 2 m. Líneas más altas requieren ángulos de apantallamiento inferiores.

Para obtener más información, consulte IEEE Std 1243 y sus referencias. La mayoría de las curvas de ángulo de blindaje se dibujan para circuitos de

transmisión, comenzando con una corriente crítica de 5 kA para provocar una descarga disruptiva por falla de blindaje. Debe reconocerse que las corrientes críticas para los circuitos de distribución serían más bajas, con un rango de 2–3 kA aceptado como la corriente mínima de impacto de una descarga atmosférica. Esto actuaría para reducir el ángulo de protección requerido.

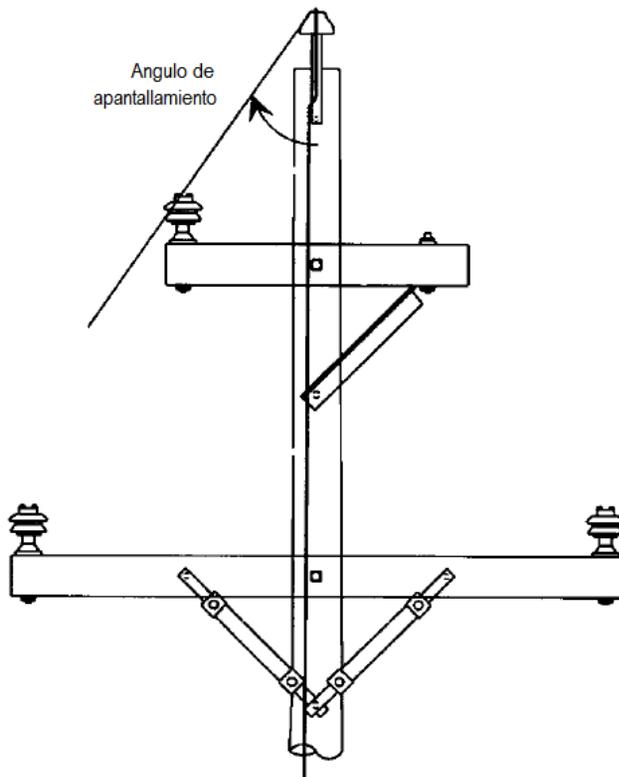


Figura 7. Ángulo de apantallamiento del cable de guarda.

Las mediciones recientes de la red de detección de descargas atmosféricas en América del Norte indican la posibilidad de valores de corriente mediana más bajos; esto también reduciría el ángulo de blindaje requerido para una tasa de descarga disruptiva de falla de blindaje objetivo. Los modelos electrogeométricos que forman la base de las recomendaciones del ángulo de blindaje también están bajo revisión continua.

En áreas donde las líneas de distribución con un ángulo de blindaje de 45° funcionan bien, esta

práctica puede continuar. Para los estándares de construcción o diseño más nuevos, se debe considerar un ángulo de blindaje más pequeño de 30°

## 7.2. Requerimientos de aislamiento

La efectividad del cable de guarda en las líneas de distribución depende en gran parte del aislamiento disponible entre la línea de tierra y los conductores de fase. Si la línea de tierra está en contacto con el poste en toda su altura, es difícil proveer un adecuado aislamiento.

En un poste de madera, generalmente es necesario aislar la línea de tierra del poste en la vecindad de los aisladores de fase y las crucetas. Esto puede lograrse utilizando varillas de fibra de vidrio, o paralelos montados horizontalmente en el poste para sostener el cable de guarda 30 – 60 cm alejado del poste. El VFIC de la línea de tierra a la fase más cercana es el valor más limitante de varias trayectorias. Se debe tener precaución de aislar los cables tensores para obtener el necesario VFIC.

Un VFIC en exceso de 250 – 300 kV es necesario para tener una aplicación efectiva de cable de guarda. Utilizando separadores para la línea de tierra, no es difícil lograr el nivel de aislamiento en las líneas de distribución.

## 7.3. Efecto de las puestas a tierra y el nivel de aislamiento

La efectividad del cable de guarda depende en gran medida de la puesta a tierra. Para que el diseño de un cable de guarda sea efectivo, las resistencias a tierra deben ser menores a 10 Ohmios si el VFIC es menor de 200 kV. Si se presta atención al nivel de aislamiento y el VFIC es de 300 a 350 kV, una resistencia de puesta a tierra de 40 Ohmios generará un comportamiento similar.

El cable blindado debe conectarse a tierra en cada polo para obtener resultados efectivos.

La figura 8 muestra el comportamiento ante descargas directas y el efecto de puestas a tierra con un ejemplo de una simulación en computador de un cable de guarda con VFIC de 175 kV y de 350 kV.

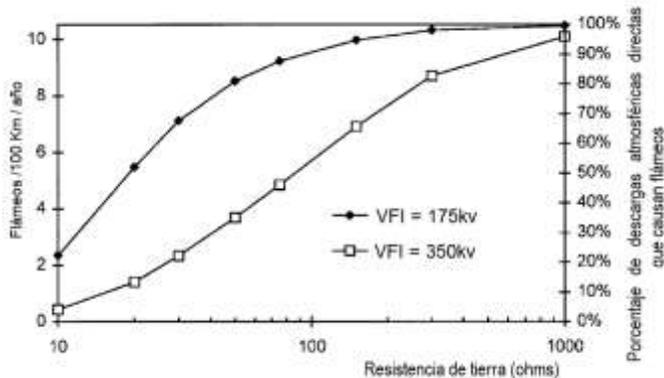


Figura 8. Efecto de la resistencia de puesta a tierra en el rendimiento del cable de guarda (descargas atmosféricas directas)

Las líneas de distribución construidas debajo de estructuras de transmisión pueden ser muy susceptibles especialmente a flámeos inversos. Estructuras de mayor altura y amplitud atraerán más descargas directas. Se debe tener cuidado de mantener altos niveles de aislamiento para evitar unas ratas de flameo innecesariamente altas.

#### 7.4 Líneas de distribución debajo de líneas de transmisión.

Las líneas de distribución construidas debajo de las estructuras de transmisión pueden ser especialmente susceptibles a las descargas disruptivas o backflashover. Las estructuras de mayor altura y los derechos de paso más grandes atraerán impactos más directos a las estructuras. Se debe tener cuidado para mantener altos niveles de aislamiento para evitar índices anormalmente altos de descargas disruptivas.

Además, el esfuerzo de voltaje desarrollado para causar un flameo inverso o backflashover del voltaje disruptivo es mayor en el circuito de distribución que en el circuito de transmisión. Esto

ocurre porque los conductores de distribución están más alejados del cable blindado y por lo tanto, tienen un voltaje acoplado más bajo y un voltaje más alto a través del aislamiento en comparación con cualquiera de los conductores de transmisión.

La resistencia del aislamiento en el subsuelo de distribución también suele ser menor que en el circuito de transmisión. Los conductores de distribución retrocederán primero y luego ayudarán al rendimiento del circuito de transmisión al aumentar el acoplamiento a esos conductores.

Se debe tener cuidado para mantener una baja resistencia a tierra y altos niveles de aislamiento para evitar índices anormalmente altos de flameo en los circuitos de distribución. Los descargadores o pararrayos de línea en cada poste también deben considerarse para circuitos subterráneos. Estos pararrayos pueden ayudar incluso si se instalan en una sola fase, al aumentar el voltaje acoplado en las otras fases.

#### 7.5. Cables de guarda y descargadores

Para eliminar efectivamente los flámeos, deberán utilizarse descargadores o pararrayos en cada poste y en cada fase conjuntamente con el cable de guarda. Los descargadores protegerán el aislamiento contra flámeos inversos o backflashover. El cable de guarda desviará la mayoría de la corriente a tierra, de tal manera que los descargadores no estarán sometidos a una alta energía absorbida. Los descargadores permiten que el diseño del cable de guarda sea menos dependiente del nivel de aislamiento y de la puestas a tierra.

#### 8. Descargadores para protección de líneas

Los descargadores de distribución son utilizados eficazmente para proteger equipos tales como transformadores y reguladores. La función de estos descargadores es de presentar altas impedancias bajo los voltajes normales de operación y llegar a tener muy bajas impedancias

durante las condiciones de la descarga atmosférica.

El descargador conduce la corriente a tierra mientras que está limitando el voltaje del equipo a la suma del voltaje de descarga del descargador más el voltaje inductivo desarrollado por la corriente de descarga en la línea del descargador y en la línea de tierra.

Los descargadores pueden ser utilizados para proteger el aislamiento de las líneas de distribución previniendo flámeos e interrupciones del circuito. Varios tipos diferentes de descargadores se tienen disponibles por ejemplo Carburo de silicio gapped, óxido metálico gapped o no gapped.

Desde el punto de vista de protección del aislamiento de una línea de distribución, todos se comportan de manera similar. Las diferencias en las características del voltaje de descarga causarán solamente una pequeña diferencia en la protección del aislamiento, puesto que existe un margen considerable.

Para la selección de la capacidad del descargador referirse a la norma IEEE Std C62.22-1991 o a los catálogos de los fabricantes.

Para protección de equipos, (especialmente cables subterráneos), es necesario seleccionar un descargador con el más bajo nivel de protección posible. No obstante, para protección del aislamiento de la línea esto no es necesario puesto que el nivel de protección del descargador es generalmente mucho más bajo que el nivel de aislamiento de la línea.

Cuando utilizamos descargadores para protección, la rata de falla de los descargadores adicionados deberá ser considerada junto con la mejora en el comportamiento al flameo de la línea obtenida por aumentar los descargadores.

### **8.1. Consideraciones en la longitud del cable de conexión del descargador.**

El cable de conexión del descargador que conecta la línea de distribución y los terminales de puesta a tierra de los descargadores del equipo que ellos protegen contienen una pequeña cantidad de inductancia inherente. Esta inductancia puede causar  $L(di/dt)$  caídas de voltaje que aparecen a través del cable que conduce la corriente de la descarga atmosférica. Cualquier caída de voltaje a través del cable de conexión del descargadores se sumará al voltaje de descarga del descargadores. Este aumentará el voltaje que aparece a través del dispositivo protegido por el descargadores.

El efecto de la longitud del cable de conexión del descargadores en la protección del aislamiento de la línea de distribución no es tan significativo como lo es con la protección del equipo. Para equipo que está por encima el margen es generalmente muy alto. Igualmente, el aislamiento de la línea es generalmente mucho mayor que el nivel básico de aislamiento, NBA (BIL), estándar del equipo. Por supuesto es siempre una buena práctica mantener los cables de la línea de distribución del descargador y las puestas a tierra tan cortas y rectas como sea posible. Ver IEEE Std C62.22 para más información sobre longitud del cable de conexión del descargador.

### **8.2. Flámeos por descargas cercanas**

Los descargadores pueden reducir enormemente las tasas de flameo debidas a voltajes inducidos por descargas atmosférica en áreas cercanas. La figura 9 muestra los resultados para un nivel de aislamiento de 150 kV de un circuito sin puesta a tierra. Observe que espaciamientos relativamente amplios entre descargadores pueden reducir significativamente flámeos por voltajes inducidos, (8 tramos generan al menos 25% de reducción).

En muchos circuitos de distribución con transformadores, los descargadores utilizados para proteger los transformadores pueden proveer

una protección significativa a los flámeos inducidos.

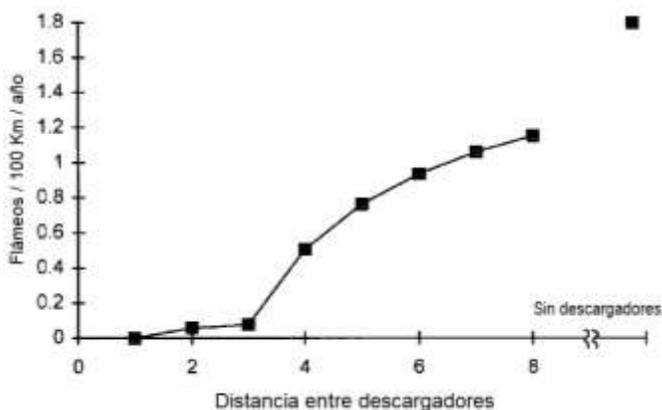


Figura 9. Espaciamiento entre descargadores para flámeos de voltajes inducidos

Los descargadores pueden ser aún más efectivos para reducir flámeos inducidos si son utilizados para proteger postes con pobres niveles de aislamiento. Estos mecanismos débiles pueden incluir cortacircuitos, postes terminales de línea, o postes de cruce. Instalar descargadores en estos postes puede ser mucho más efectivo en costos que mejorar el nivel de aislamiento.

### 8.3. Flámeos debido a descargas atmosféricas directas.

La protección contra las descargas atmosféricas directas es difícil debido a las altas corrientes de la onda de impulso, a lo empinado de la pendiente de incremento de voltaje y al alto contenido de energía de las descargas atmosférica.

En teoría, los descargadores pueden proteger eficazmente contra descargas directas, pero ellos deben ser utilizados en intervalos muy cortos (virtualmente cada poste). La figura 10 muestra un estimativo para espaciamiento entre descargadores con el fin de proteger contra descargas atmosféricas directas.

El análisis en la figura 10 asume que el cable de neutro está puesto a tierra en cada poste. El alto

número de flámeos puede ser engañoso de acuerdo a la figura 10, donde el cable de neutro no está conectado a tierra, excepto en los postes en los cuales los descargadores están aplicados a todas las fases y el aislamiento neutro a tierra es alto.

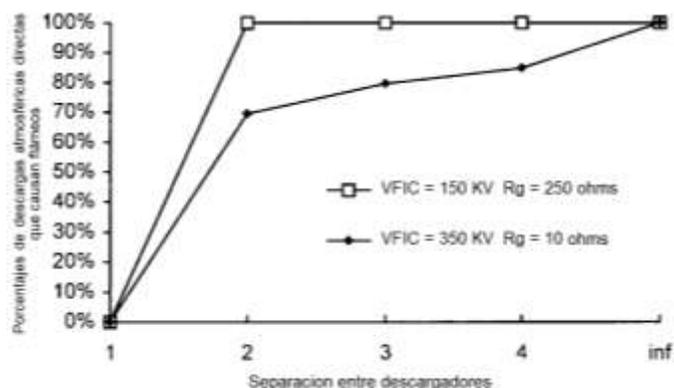


Figura 10. Separación entre descargadores para protección contra descargas atmosféricas directas.

#### 8.3.1. Protección de la fase superior con descargadores

Si el conductor en la parte superior está situado de tal manera que interceptará todas las descargas atmosférica, se deberán colocar descargadores en la fase superior lo cual hace que actúe como un cable de guarda.

En esta forma el descargador de la fase superior conducirá la onda de impulso a tierra. El circuito será protegido si la resistencia de puesta a tierra es lo suficientemente baja y si el aislamiento de las fases no protegidas es lo suficientemente alto.

Como un cable de guarda, se debe tener mucho cuidado para mantener un alto nivel de aislamiento en las fases no protegidas. Las curvas para el cable de guarda, (ver figura 8), pueden ser utilizadas para estimar la efectividad del diseño del descargador en la fase superior.

#### 8.3.2. Capacidad de los descargadores ante descargas atmosféricas directas

En aplicaciones expuestas, (por ejemplo una línea de distribución en campo abierto sin cable de guarda), los descargadores de la clase de distribución y de óxidos metálicos pueden sufrir fallas ocasionales debido a descargas directas.

Un porcentaje importante de descargas atmosféricas directas pueden causar que los descargadores absorban energía en exceso de ambos, la capacidad publicada por el fabricante y la onda de prueba de descarga de 4/10 microsegundos.

Esto se mitiga por el hecho que los bloques de óxidos metálicos han demostrado tener una mayor capacidad de absorber energía que la capacidad que se conocía.

Otro mecanismo de falla de algunos diseños de descargadores de óxidos metálicos es la ocurrencia de flámeos alrededor de los bloques cuando el descargador está sometido a múltiples eventos de multidescargas atmosféricas.

Los flámeos superficiales debidos a descargas múltiples son mucho menos frecuentes en descargadores sin espacios de aire tales como los de cubiertas poliméricas.